

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА. БИТ И ДЖОУЛЬ

Александров В.В., Кулешов С.В.
(СПИИРАН, alexandr@ias.spb.su)

Александров В.В., Кулешов С.В. АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА. БИТ И ДЖОУЛЬ

Аннотация. Рассматриваются различие понятий хаоса и сложности, алгоритма и программы, дается понятие цифровой программируемой технологии, предлагается концептуальная связь между энергией и числом бит.

Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. ALGORITHM AND PROGRAM. BIT AND JOULE

Abstract. *Distinction of concepts of chaos and complexity are considered. The concept of digital programming technology is given. Conceptual relation between energy and number of bits is offered.*

Введение

Путаница с понятиями «информация», «данные», «формат», «протокол» в их обиходном и жаргонном использовании вызывает противоречия в технической литературе и реализации интерфейсов программ. Это приводит к непониманию принципов работы систем компрессии и передачи данных, к ошибкам в постановке задач вновь разрабатываемых систем, где истинная проблема подменяется проблемой адаптации стандартных, универсальных методов и алгоритмов к условиям, в которых эти методы не применимы. Подобный пример, связанный с проблемой фильтрации показан в [1].

Специфика компьютерных, телекоммуникационных технологий работы с данными приводит к понятию **информационное представление**.

Введем следующие определения:

Информационное представление – запись значений параметров идентифицируемых объектов (процессов), для сохранения или передачи информации об информационном объекте. Набор параметров объекта, значения которых возможно использовать, определяются сенсорными возможностями человека или технического устройства. Потенциальная длина информационного описания – бесконечность, т.е. возможно неограниченное увеличение количества параметров и увеличение точности их представления. Информационным представлением (идентификацией) могут являться **данные** (представленный непосредственно цифровыми отсчетами сигнал), формат (полученное с помощью алгоритма представление), терминальная программа. Это развивающийся процесс, который постоянно уточняет универсальную характеристику Лейбница – принцип идентификации неразличимости. В англоязычной литературе эти понятия рассматриваются как инфология и дейталогия [2].

Программируемая технология – способ представления (инфология) и обработки (дейталогия) информации в виде ее битового представления.

Битовое представление – цифровое представление данных в двоичном виде. Битовое представление требует неизменности данных при передаче, сохранении и последующем считывании, а методы хранения и передачи обеспечивают принцип идентификации неразличимости Лейбница (при аналоговом представлении данных этот принцип требует определения возможной точности измерения). Способ организации битового представления определяется форматом.

Формат – способ записи информационного описания для получения битового представления, а также формальные соглашения для обеспечения записи и чтения данных таким способом. Формат может содержать некоторое преобразования данных (MP3, JPEG), а также может быть «прозрачным», т.е. битовое представление этого формата будет совпадать (возможно, исключая служебные заголовки) с непосредственными отсчетами сигнала (WAV, RAW). В этом случае важно отличать информационное описание объекта, допускающее, например, уменьшение точности представления

значений, повреждение данных при передаче от битового представления, изменение значений которого не допустимо.

Терминальная программа – программа в ее битовом представлении, формирующая в качестве выходного результата сигнал (данные) [3].

Передача данных – использование физической среды для передачи данных в пространстве.

Хранение данных – использование материального носителя для сохранения данных (передачи данных во времени).

Носитель данных – материальный объект, в котором возможно выборочное изменение состояний отдельных элементов, считывание их состояния. Носитель данных должен обеспечивать неизменность своих элементов в течение времени хранения.

Среда передачи данных – физическое соединение, по которому осуществляется передача от одного устройства к другому. Физическая сущность среды влияет только на максимально возможное число передаваемых **бит в секунду**. Заметим, что это эквивалент понятия полосы пропускания, но несвязанный со спектральными свойствами и физическими характеристиками среды.

Соотношение между уровнями представления информационного объекта приведено на рис. 1.



Рис. 1. Уровни представления информационного объекта

Любое битовое информационное представление объекта дает возможность реализации следующих задач, использующих идентификацию неразличимости:

1. Уникальная идентификация – восстановление информационного объекта в соответствии с исходной точностью представления данных: сигнала, текста, изображений, аудио-, видео-поток.

2. Множественная идентификация информационного объекта (отнесение объекта к некоторому классу). Данная задача используется в большинстве практических приложений при работе с информационными описаниями (как в технических приложениях, так и в повседневной жизни). Например, формат представления звука может быть ориентирован либо на речь, либо на музыку для различной аудитории. Это приводит к разной требуемой битовой скорости передачи данных.

Битовое представление приводит к необходимости ориентации на потребительские запросы к требуемому качеству при выборе критерия множественной идентификации.

Битовое информационное представление объекта непосредственно не несет никакой семантики, оно содержится в критерии множественной идентификации при ориентации на семантико-смысловое содержание. Например, лейбл на диске «МPEG-2, зона 5» задает параметры программируемой технологии, реализующей видео-поток на соответствующем оборудовании.

Хаос vs сложность

Рассмотрим противопоставление (versus = vs) двух синонимичных понятий исходя из определения хаоса и сложности как труднопрогнозируемых событий.

Второй закон термодинамики постулирует направленность процессов от хаоса к порядку, от «более нагретого» к «менее нагретому». Неопределенность системы измеряется через энергетический энтропийный критерий.

Естественно, что негэнтропия, как отрицательная энтропия впервые была определена как мера упорядоченности. Это значит, что первоначальное понятие информации было связано с порядком, т.е. с существованием возможности уникальной идентификации объектов, сложность которого зависела от определения того или иного порядка.

Заметим, что исследования зависимости фиксируемого количества различных состояний сигнала и идентифицируемых этим сигналом информационных объектов для телефонии (телеграфии) Найквистом в 1917 г. [4] привели к понятию полосы пропускания и числу различных состояний, что в дальнейшем вылилось в общую теорию связи.

Найквист vs Колмогоров

Изначально Найквист говорил об информации как о числе различных состояний (в работе Найквиста числа различных значений тока), которыми можно закодировать сообщение. Найквист показал, что количество отличающихся друг от друга значений тока, которое можно передавать по каналу в секунду, равно удвоенной ширине полосы используемых частот. Кроме того, скорость передачи букв текста пропорциональна логарифму числа используемых значений тока – происходит обмен числа различных состояний сигнала на число идентифицируемых объектов.

Отсюда можно ввести понятие **информационного объекта** как любого идентифицируемого объекта.

При использовании битовой системы это сводится к возможности построения уникального идентифицируемого объекта, что и было замечено А. Н. Колмогоровым [5].

Подход Шеннона связан с интегральной характеристикой оценки ансамбля объектов (белый шум, “бернуллиевские последовательности”), оперируя со средними, вероятностными и статистическими характеристиками. Физическая интерпретация информационной характеристики в форме энтропии, как меры неупорядоченности физической системы, оперирует с параметрами системы, такими как давление и температура, учитывая лишь средние статистические параметры частиц, а не отдельной частицы.

Так, белый шум определяется интегральной энергетической характеристикой равенства мощности процесса во всем спектральном диапазоне. Программная реализация, воспроизводящая белый шум в компьютере, с точки зрения Колмогорова, есть программируемая технология. Это означает, что множество программ разной длины (реализующих разные алгоритмы с помощью различных технологий программирования), могут давать эквивалентные результаты. Такое компьютерное и энергетическое представление белого шума, по сути, сводится к различному пониманию **сложности**.

Необходимо различать понятие хаоса, как некоего процесса через энтропийный интегральный энергетический критерий неопределенности и хаос, как длину (сложность) программы, воспроизводящей заданный процесс.

В первом случае сложность определяется как сложность вычислений математической модели (P сложность, NP сложность).

Другая сложность сводится к длине битовой программы (форматов, кодеков), восстановления исходного процесса.

Отсюда возникает необходимость различать алгоритмическую теорию А. Н. Колмогорова и исходящую из нее программируемую технологию от традиционного первоначально исходного определения алгоритма Аль-Хорезми, как организацию вычислительного процесса физических и математических моделей.

Различие классической теории информации (по Шеннону) и алгоритмической теории, предложенной Колмогоровым и сводимой к программируемой технологии, заключается в том, что основные понятия теории информации должны и могут быть обоснованы без обращения к теории вероятности и так, что идентификация, а также понятие “количество информации” оказываются применимы к индивидуальным объектам, а не ансамблям.

Очевидно, что энтропия – свойство ансамбля частиц. Теория Шеннона описывает свойства аналогового канала, что соответствует ансамблевой идентификации, т.е. идентификация осуществляется на основе функции корреляции и среднеквадратического отклонения.

Теория, основанная на программируемой технологии, предполагает возможность выделения из системы объекта, идентификации и измерения его характеристик. Измеряемые параметры объекта могут быть описаны его информационно-программным представлением.

Для битового представления не существует параметрической ансамблевой идентификации (например, минимума СКО или метода моментов), а существует лишь уникальная идентификаторная идентификация, основанная на принципе идентификации неразличимости. Неразличимость определяет инвариантные способы выражения информационного содержания. Примером применения программируемой технологии может служить [6], где для передачи сложного сигнала большой длины используется лишь передача начальных параметров итерационной функции, которая производит однозначное восстановление сигнала на приемной стороне.

А. Н. Колмогоров [5] выразил это как алгоритмическую запись идентифицируемости объекта.

Эмпирически понятно, что если какой-либо объект “просто” устроен, то для его описания достаточно небольшого количества информации, т.е. его битовое представление является коротким; если же он “сложен”, то его описание должно содержать много информации, соответственно его битовое представление будет длиннее.

Стандартным способом задания информации об идентификации объектов, процессов будем считать двоичные последовательности, начинающиеся с единицы,

1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, ...,

являющиеся двоичными записями натуральных чисел. Будем обозначать через $l(n)$ длину последовательности n .

Пусть мы имеем дело с какой-либо областью объектов D , в которой уже имеется некоторая стандартная нумерация объектов номерами $n(x)$. Однако указание номера $n(x)$ далеко не всегда будет наиболее экономным способом выделения объекта x .

Так двоичная запись числа

$$9^{9^9}$$

необозримо длинна, но мы его определили достаточно просто, воспользовавшись при этом форматом записи чисел в виде степеней. Знание о соглашениях формата позволяет осуществлять задачу однозначного восстановления объекта,

Пусть существуют способы задания данных, которые каждому двоично записанному числу p ставят в соответствие некоторый номер

$$n = S(p)$$

Таким образом, способ задания объекта из D становится не чем иным, как функцией S от двоичного числа с двоичным значением.

Для каждого объекта из D естественно рассмотреть приводящие к нему p наименьшей длины $l(p)$. Эта наименьшая длина и будет “сложностью” объекта x при “способе задания S ”:

$$K_s(x) = \min l(p), \quad S(p) = n(x).$$

Назовем p “программой”, а S — “методом программирования”. Тогда можно будет сказать, что p есть минимальная длина программы, по которой можно получить объект x при методе программирования S .

Подчеркнем, что именно битовое представление данных позволяет перейти к **цифровой программируемой технологии**.

Энтропийная энергетическая характеристика составляет основу ансамблевого поведения объекта и служит лишь критерием идентифицируемости. Тогда хаос с точки зрения ансамбля характеризуется интегральной энергией.

Алгоритм-программная реализация идентифицирует-конструирует объект или процесс, отождествляя их с числом требуемых для их информационного воспроизводства бит. Отсюда можно предложить следующую концептуальную связь между энергией и числом бит. Заметим, что в [4] был пример подобной связи.

Информация vs энергия

...«Рассмотрим основные понятия теории информации. Исходным будем считать понятие условной энтропии объекта x при заданном объекте y , $H(x|y)$, которую можно интерпретировать как количество информации, необходимое для задания объекта x в обстановке, когда объект y уже задан.

Обозначая через ϕ “заведомо заданный объект”, получим безусловную энтропию $H(x|\phi) = H(x)$.

Информация, содержащаяся в объекте y относительно объекта x , определяется формально при помощи вычитания $I(x|y) = H(x) - H(x|y)$... [5]

Обратим внимание на тонкий переход от понятия условной энтропии объекта к объектной идентификации, постулируемой Колмогоровым, как минимальная длина, записанной в виде последовательности нулей и единиц “программы” P , которая позволяет построить объект x , имея в своем распоряжении объект y , т.е. **$H(x|y) = \min l(P)$**

Такой подход отождествляет переход от энергетического-энтропийного критерия к битовому представлению программы и подмене **данные-программа-данные**, которая изменяет концепцию передачи данных. Передаваться могут не только последовательности данных (то есть битовое представление), но и непосредственно терминальные программы, порождающие эти данные также в их битовом представлении [3].

Рассмотрим физическую эквивалентность между количеством битов и энергией, требуемой для работы программы с входными данными. При этом будем понимать **бит** как физическую единицу, характеризующуюся двумя устойчивыми состояниями, изменяющимися под воздействием входных данных и программы.

Заметим, что в 1962 г. Дж. Пирс [4] предложил наглядную схему связи между битом и его энергией через производимую им работу. В соответствии с физическими законами для определения состояния системы при температуре T потребуется энергия

$$W = 0,693kT \log_2 n = kT \ln n, \text{ где}$$

W – энергия – Джоуль,

k – постоянная Больцмана,

n – количество возможных состояний,

T – температура

Минимальная мощность передатчика при скорости потока S бит/с

$$P = 0.693kTS, \text{ где}$$

P – мощность, Вт.

Пример связи объектной и ансамблевой энергетической идентификации проявляется в телекоммуникационных системах, где слабым звеном является ограниченность объема передаваемых бит энергетической емкостью аккумулятора.

Возьмем для примера сотовый телефон. Общеизвестно, что его батареи аккумулятора хватает на определенное время работы во время разговора.

На что расходуется эта энергия? Если не учитывать вспомогательные функции типа вывода на экран, подсветки и других непосредственно не относящихся к передаче голоса функций, то она расходуется на питание процессора, звуковых цепей и передатчика.

В связи с тем, что в телефонах формата GSM передача производится в цифровом формате, то время работы батареи зависит от числа переданных битов данных.

$$P = k l S(I) / T, \text{ где}$$

P – потребляемая мощность, Вт,

l – длина информационного сообщения, бит,

T – время передачи, с,

$S(I)$ – функция сложности информационного сообщения, показывающая во сколько раз можно компрессировать сообщение I ,

k – коэффициент, Вт с/бит,

Присутствие функции $S(I)$ требуется из-за того, что передаются не все биты оцифрованного звукового сообщения, так как использование в канале передачи процессоров позволяет компрессировать входной поток. Значение $S(I)$ показывает насколько эффективно алгоритм компрессии, реализованный на процессоре, сжимает входные данные.

При этом необходимо учитывать, что для более эффективной компрессии в общем случае требуется более быстродействующий процессор, который в свою очередь потребляет большую мощность. Естественно, что потребляемая процессором мощность также зависит от его особенностей и технологии его производства.

Для современной технологии производства (2005 год) и типовых параметров телефона (скорость GSM потока 13 кбит/с, емкость аккумулятора 800 мА/ч, время работы в режиме разговора 4 часа) возможно определить, что для передачи 1 бита данных требуется порядка 0,06 мДж энергии.

Это позволяет предложить следующее концептуальное соотношение бит-энергия:

$$I \leq KE = Kmc^2, \text{ где}$$

$E=mc^2$ – энергия, требуемая для передачи сообщения I бит,

K – коэффициент Колмогорова, показывающий эффективность выбранной $I(P)$ программы: форматов и протоколов хранения и передачи данных, а также уровень развития технологии и КПД оборудования. Увеличение скорости процессоров и памяти за счет освоения новых физических элементов приближает K к теоретически возможному пределу формирования физически устойчивых состояний «1» и «0».

Вместе с этим известным фактом является то, что масса информационного носителя (например CD-R диск) одинакова до записи («чистый» диск) и после записи (диск с данными), ведь количество вещества не изменяется, изменяется лишь состояние отдельных его элементов. Приведенная формула показывает не изменение массы при наличии и отсутствии информации, а минимальную массу носителя для сохранения требуемого объема данных (задача хранения) или массивный эквивалент минимальной энергии для передачи требуемого объема данных (задача передачи данных).

Соотношение видов битового представления и энергопотребления в телекоммуникационных системах при передаче данных.

Пусть требуется передать сообщение при скорости равной N бит/сек.

Пусть для передачи одного бита данных требуется затратить P Дж (с учетом мощности передатчика, и энергопотреблением его вспомогательных узлов). Следовательно, для передачи указанного сообщения требуется мощность PN Вт.

Использование алгоритмов компрессии позволяет уменьшать длину сообщения, и, следовательно, использовать меньшую скорость передачи, что уменьшает требуемую мощность.

Вместе с тем, эффективность различных программ компрессии в среднем пропорциональна количеству операций над данными, что в сочетании с необходимостью выполнять передачу данных в реальном времени требует применения процессора соответствующей производительности. Производительность процессора, в свою очередь, также пропорционально потребляемой им мощности.

Использование процессора для компрессии передаваемых данных способствует уменьшению скорости потока, что уменьшает энергопотребление передатчика. Одновременно с этим использование более эффективной компрессии увеличивает энергопотребление процессора, что может свести на нет выигрыш в энергопотреблении передатчика.

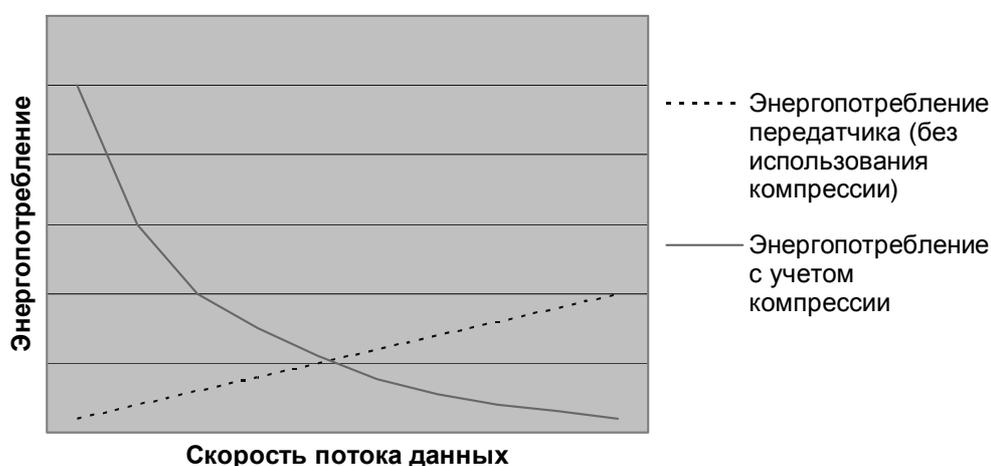


Рис. 2. Соотношение скорости передачи данных и энергопотребления при использовании компрессии данных

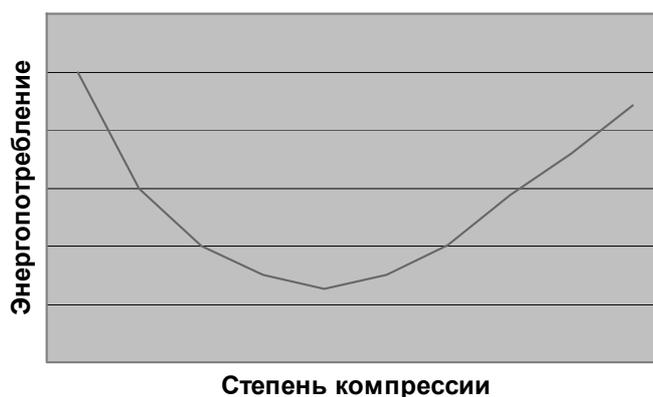


Рис. 3. Зависимость общего энергопотребления (передатчик + процессор) от степени компрессии данных

Из рис. 2 и 3 видно существование точки наиболее эффективной компрессии (и скорости передачи) данных с точки зрения энергопотребления. Такая точка может быть

определена для конкретного типа данных, программ компрессии и используемой элементной базы, на которой реализованы передатчик и компрессор.

Естественно, что подобные выкладки не учитывают возможность радикального снижения энергопотребления, например, с помощью перехода на процессор, выполненный по другой технологии и обладающий теми же показателями производительности или разработки принципиально иных программ компрессии, а лишь указывают на существование точки энергетического оптимума и позволяют выбрать ее при заданных параметрах разрабатываемой системы.

Заключение

Важно различать понятия алгоритма и программы в соответствии с битовым представлением вычислительного процесса. Понятие алгоритма связано с вычислительным процессом физической и математической модели. На этом основано традиционное понятие сложности (P сложность, NP сложность). В программируемой технологии сложность определяется длиной битовой программы восстановления исходного потока данных.

Это приводит к установлению соотношения между энергетическими характеристиками процессора и битовым объемом представления данных. Оценка битовой пропускной способности определяется свойствами физической среды для передачи данных и свойствами физической реализации программируемой технологии. Заметим, что битовая пропускная способность не имеет ничего общего с классическим определением частотной полосы пропускания.

Отсюда и недопонимание ярких рекламных лозунгов «сколько же цифровых (телевизионных) каналов возможно разместить в одном аналоговом (телевизионном) канале?».

Литература

1. Калман Р. Открытие или изобретение: Ньютоновская революция в технологии систем. — Авиакосмическое приборостроение, 2004 г. № 6.
2. Langefors B. Infological Models and Information User Views. — Information Systems, Vol. 5, 1980 — p.17-32.
3. Александров В. В., Кулешов С. В. Нарротивные представления информационных процессов. — Информационные процессы, Том 4, № 2, 2004, стр. 160-169.
4. Дж. Пирс. Символы, сигналы, шумы. — М.: Мир, 1867, с. 234.
5. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации». Проблемы передачи информации, 1965, 1, стр. 3-11.
6. Кулешов С. В. Фрактальное шифрование. — Труды СПИИРАН. Вып. 2, т.1 - СПб: СПИИРАН, 2004, с. 231-235.